

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ФАЗОВОГО СДВИГА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СВЕТА ЧЕРЕЗ ПЛЕНКИ ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

А. В. Агашков, Н. А. Хило, А. М. Варанецкий

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

E-mail: a.agashkov@ifanbel.bas-net.by

Идея расширения традиционного набора оптических сред за счет включения в него материалов с отрицательным показателем преломления была последовательно развита Веселаго в статье [1]. В частности, было показано, что слой материала с  $n < 0$  может действовать подобно оптической линзе, а именно, фокусировать падающий расходящийся световой пучок. В последние годы интерес к таким материалам сильно возрос, что обусловлено, в первую очередь, возросшими технологическими возможностями их создания (см., напр. [2]). Значительную роль также сыграла статья Пендри [3], где показано, что слоистая структура металл-диэлектрик (МД) может фокусировать не только бегущие волны, но и ближнее поле. В последнем случае оптическое разрешение не ограничено известным пределом  $\Delta x = \lambda/2NA$ , где  $NA$  – числовая апертура, и поэтому плоские линзы ближнего поля весьма перспективны в оптической нанолитографии (см., напр. [4]).

Ранее было показано, что ключевым признаком плоской линзы является вогнутость ее фазовой характеристики [5]. Как показал анализ, для прямого измерения фазового сдвига  $\Delta\varphi$  света, прошедшего слой метаматериала, необходимо использовать специфические интерферометрические методы. Если метаматериал обладает выраженной анизотропией, то фазовый сдвиг может рассчитан из измерения разности фаз ортогонально поляризованных пучков [6]. К сожалению, общепринятая конфигурация дифференциального поляризационного интерферометра (walk-off interferometer) обладает существенными недостатками применительно к данной задаче. Во-первых, в ней достаточно сложно исследовать зависимость фазового сдвига пучка света  $\Delta\varphi$  от угла падения  $\theta_{in}$ . Во-вторых, она не обеспечивает корректного измерения фазового сдвига при наличии сильного поглощения в исследуемом материале. В данной работе на основании теоретического расчета проведено прямое измерение фазовых сдвигов при прохождении света через двухслойные МД- пленки. Для расчета фазового сдвига использован известный метод матрицы переноса. Трудности в прямом измерении отрицательного фазового сдвига были успешно преодолены с помощью разработанного нами модифицированного дифференциального поляризационного интерферометра. На

рис. 1 показаны графики зависимости  $\Delta\varphi(\theta_{in})$  ТМ-поляризованного пучка на длине волны света  $\lambda = 632.8$  нм для образца, состоящего из подложки из стекла К8 (2.9 мм), слоя  $\text{SiO}_2$  (100 нм), двухслойной пленки  $\text{Ag}$  (20 нм)/ $\text{SiO}_2$  (10 нм), нанесенной на часть поверхности. Высокочастотные биения интенсивности из-за интерференции в подложке устранялись уменьшением ширины гауссова пучка и исключением углов падения, близких к нормальному. Как видно из рисунка, совпадение расчетной и экспериментальной кривых достаточно хорошее. Точность совпадения возрастает с ростом угла падения из-за более полного подавления интерференционного эффекта. Зависимости  $\Delta\varphi(\theta_{in})$  и оптической разности хода  $\Delta d(\theta_{in})$  для  $p$ - и  $s$ -поляризованных пучков для структуры  $\text{Ag}(20 \text{ нм})/\text{SiO}_2(20 \text{ нм})$  представлены на рис. 2. Как следует из приведенной экспериментальной зависимости, с ростом угла падения появляется и монотонно возрастает анизотропия фазового сдвига и оптической разности хода для  $p$ - и  $s$ -поляризации.

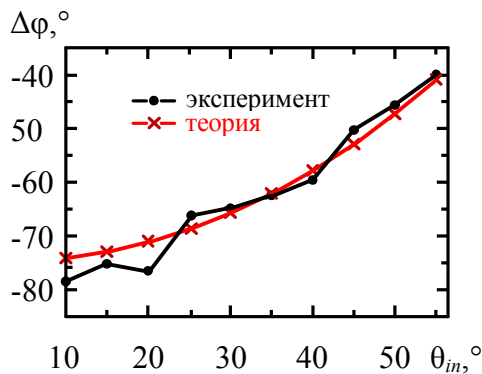


Рис. 1. Фазовый сдвиг в структуре  $\text{Ag}$  (20 нм)/ $\text{SiO}_2$  (10 нм)

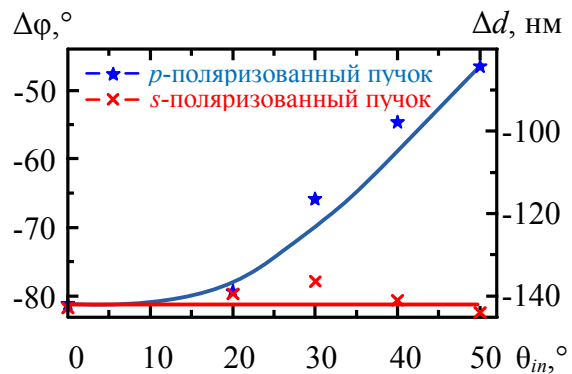


Рис. 2. Фазовый сдвиг и оптическая разность хода для  $s$ - и  $p$ -поляризованных пучков в структуре  $\text{Ag}$  (20 нм)/ $\text{SiO}_2$  (20 нм)

Таким образом, прямыми измерениями экспериментально подтвержден отрицательный фазовый сдвиг светового поля двухслойной структурой  $\text{Ag}/\text{SiO}_2$ . Экспериментально обнаружено появление и монотонный рост анизотропии фазового сдвига (оптической разности хода) для  $p$ - и  $s$ -поляризованных пучков, прошедших через подобную структуру.

1. Веселаго В. Г. // УФН. 1967. Т. 92, № 3. С. 517–526.
2. Cai W., Shalaev V. // Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications. NY: Springer-Verlag. 2010. 200 p.
3. Pendry J. B. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85, No. 18. P. 3966–3969.
4. Blaikie R. J., Melville D. O. S., Alkaisi M. M. // Microelectronic Engineering 83. 2006 P. 723–729.
5. Belyi V., Binhussain M., Khilo N., Kazak N. // Advance Electromagnetics. 2014. V. 3. P. 1–5.
6. Kildishev A. V., Cai W., Chettiar U. K. et al // JOSA B. 2006. Vol. 23. P. 423–433.